Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 24, No. 2, Summer 2026, p. 281-297

Evaluation of Foliar Application of Cytokinin, Iron, Zinc and Selenium on Chlorophyll Fluorescence Parameters of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Drought Stress

A. Faridnia[1], F. Paknejad[1*], M. Sadeghi Shoae[2], M. N. Ilkaee[1], F. AghaYari[1]

1- Department of Agronomy and Plant Breeding, Ka.C. Islamic Azad University, Karaj, Iran
2- Sugar Beet Seed Institute (SBSI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
(*- Corresponding author's Email: Farzadpaknejad@iau.ac.ir)

Received: 22 August 2025 Revised: 27 October 2025 Accepted: 03 November 2025 Available Online: 02 December 2025	**How to cite this article:** Faridnia, A., Paknejad, F., Sadeghi Shoae, M., Ilkaee, M. N., & AghaYari, F. (2026). Evaluation of foliar application of cytokinin, iron, zinc and selenium on chlorophyll fluorescence parameters of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress. *Iranian Journal of Field Crops Research, 24*(2), 281-297. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.95050.1421

Introduction

Environmental stresses are important factors in reducing agricultural production worldwide. Plants are continuously exposed to various stresses under natural and agricultural conditions, and water scarcity is the most important limiting factor for crop yield in most parts of the world. Drought stress can cause morphological, physiological, and biochemical changes in crop plants. Cytokinin application and foliar application of micronutrients can have beneficial effects on plant photosynthesis and wheat yield under moisture stress conditions.

Materials and Methods

This study was conducted as a split-plot factorial experiment based on a randomized complete block design with three replications in two regions, Karaj and Hamadan, during the 2019–2020 growing seasons. Irrigation regimes, including three levels—(i) irrigation at 40% available soil moisture depletion throughout the growing season (control), (ii) normal irrigation from planting to the pollination stage followed by irrigation at 60% available soil moisture depletion, and (iii) normal irrigation from planting to the pollination stage followed by irrigation cutoff until maturity—were assigned to the main plots. The factorial sub-factors included low-consumption nano-elements at five levels (control, zinc, iron, selenium, and a combined application of the three elements) and cytokinin application timing at four levels (control, flowering stage, milking stage, and flowering + milking stages). Measured traits included grain yield, biological yield, and chlorophyll fluorescence parameters.

Results and Discussion

The results indicate that the effects of irrigation, cytokinin and Nano-micronutrient treatments on the studied traits were significant, but the interaction effects of these treatments were not significant. Drought stress has an inhibitory effect on various photosynthetic activities, especially photosystem II activity, in wheat. In the present study, it was determined that chlorophyll fluorescence parameters along with chlorophyll content have a special role in investigating the effects of drought stress on plant photosynthetic systems. Therefore, by applying drought stress, the rate of transpiration, gas exchange, maximum photochemical efficiency of photosystem II,

https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.95050.1421

maximum fluorescence (F_m) and photosynthesis rate decreased. However, the use of cytokinin hormone and the combined application of micronutrients significantly increased the rate of photosynthesis, stomatal conductance, transpiration intensity, maximum photochemical efficiency of photosystem II, maximum fluorescence (F_m), minimum fluorescence (F_0), relative water content of leaf and chlorophyll content. Normal irrigation treatment increased the stable fluorescence (26.68%) and the variable fluorescence index (24.78%) compared to the normal irrigation treatment until pollination and then completely stopped irrigation. Zinc + iron + selenium elements improved the stable fluorescence (26.16%) and variable fluorescence (21.48%) compared to the control treatment. Foliar application of cytokinin at pollination + grain milking increased the stable fluorescence (15.34%) and variable fluorescence (20.74%) compared to the control. Drought stress had an inhibitory effect on various activities of the photosynthetic apparatus, especially the activity of photosystem II, in wheat, but the application of micronutrients and the hormone cytokinin reduced the inhibitory effect. The improvement of photosynthesis by cytokinin and micronutrients under stress may be due to the effect of these substances in maintaining leaf chlorophyll. It seems that cytokinin and micronutrients have inhibitory effects on the functioning of the photosynthetic apparatus. According to the results obtained, it can be concluded that the decrease in the quantum yield of photosystem II is mainly due to the occurrence of disorder in the chloroplast and the decrease in chlorophyll also confirms this issue, because chlorophyll fluorescence is directly related to the activity of chlorophyll in the reaction of photosystems and can be used as a criterion for measuring the efficiency of the photosystem.

Conclusion

The combined application of nano micronutrients (zinc + iron + selenium) led to an increase in wheat yield compared to the application of each of them individually, so the combined foliar application of these three elements is recommended to increase wheat yield. Cytokinin foliar application at the pollination + grain milk stage increased wheat yield compared to application at other stages, although various sources consider the application of nano micronutrients and cytokinin foliar application important for water stress tolerance, but the results of the present study showed that in conditions of low irrigation and stress, these strategies are not recommended to reduce the negative effects of deficit irrigation.

Keywords: Chlorophyll index, Leaf relative humidity, Micronutrients, Steady fluorescence, Variable fluorescence

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۲۹۷-۲۸۱

ارزیابی محلول‌پاشی سیتوکینین، آهن، روی و سلنیوم بر شاخص‌های فلورسانس کلروفیل گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تنش خشکی

امیر فریدنیا[۱]، فرزاد پاک‌نژاد[۱]، مهدی صادقی شعاع[۲]، محمد نبی ایلکایی[۱]، فیاض آقایاری[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

چکیده

به‌منظور ارزیابی سیتوکینین و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و اثرات مفید آنان بر فتوسنتز گیاه و عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) در شرایط تنش خشکی، پژوهشی در دو منطقه کرج و همدان به‌صورت اسپلیت‌پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل‌های آزمایش شامل رژیم‌های آبیاری با سه سطح (الف: آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس در تمام دوره رشدی (شاهد)، ب: آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و ج: آبیاری در ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس تا پایان دوره رشد، آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و قطع آبیاری تا پایان دوره رشد)، در کرت‌های اصلی و فاکتوریل عناصر نانو کم‌مصرف با پنج سطح: شاهد (عدم مصرف عناصر ریزمغذی نانو)، محلول‌پاشی روی، آهن، سلنیوم و ترکیب سه عنصر (آهن + روی + سلنیوم)) و زمان استفاده از سیتوکینین با چهار سطح (شاهد (عدم مصرف)، مصرف در مرحله گل‌دهی، مصرف در مرحله شیری شدن و مصرف در مرحله گل‌دهی + شیری شدن) در کرت‌های فرعی بودند. نتایج نشان داد که تیمار آبیاری نرمال موجب افزایش فلورسانس پایدار (۲۶/۶۸ درصد)، شاخص فلورسانس متغیر (۲۴/۷۸ درصد) نسبت به تیمار آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری شد. عناصر روی + آهن + سلنیوم سبب بهبود فلورسانس پایدار (۲۶/۱۶ درصد) و فلورسانس متغیر (۲۱/۴۸ درصد) نسبت به شاهد گردید. محلول‌پاشی سیتوکینین در گرده‌افشانی + شیری شدن دانه، فلورسانس پایدار (۱۵/۳۴ درصد) و فلورسانس متغیر (۲۰/۷۴ درصد) را نسبت به شاهد افزایش داد. بنابراین اعمال تنش خشکی بر گندم قابل توصیه نیست و کاربرد هورمون سیتوکینین و همچنین عناصر ریزمغذی برای بهبود شرایط کشت گندم قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: رطوبت نسبی برگ، شاخص کلروفیل، عناصر ریزمغذی، فلورسانس پایدار، فلورسانس متغیر

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) از جمله مهم‌ترین غلات در کل دنیا و پر ارزش‌ترین گیاهان روی زمین است که بیش از هر محصول دیگری در دنیا کشت می‌شود. این گیاه راهبردی حاوی پروتئین و کالری بیشتری نسبت به سایر غلات است که بیش از هر محصول دیگری تأمین کالری نموده و بیشترین پروتئین را در رژیم غذایی انسان عرضه می‌کند (Wan et al., 2022; Seleiman & Kheir, 2018). گندم از نظر تولید و سطح زیرکشت سالانه در ایران و جهان در درجه اول اهمیت قرار دارد. سطح زیرکشت گندم دیم در ایران بیش از چهار میلیون هکتار است که بیشترین سطح زیر کشت زمین‌های زراعی را شامل می‌شود. بنابراین استقلال غذایی و خودکفایی در تأمین مواد غذایی کشور مستلزم توجه زیاد به زراعت در اراضی دیم است (Agricultural Statistics, 2022). افزایش تقاضا برای غذا و مواد مغذی به‌دلیل رشد جمعیت، اهمیت محصول گندم را بیش از پیش افزایش می‌دهد (Hussain & Jatoi, 2021).

تنش‌های محیطی از عوامل حائز اهمیت در کاهش تولید محصولات کشاورزی در سراسر دنیا هستند. گیاهان تحت شرایط طبیعی و زراعی به‌طور پیوسته در معرض تنش‌های گوناگون قرار می‌گیرند و در این میان، کمبود آب مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد محصولات زراعی در بیشتر نقاط جهان می‌باشد. تنش

۱- گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران
۲- موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Farzadpaknejad@iau.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.95050.1421

خشکی می‌تواند باعث تغییرات ریخت‌شناختی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان زراعی شود. در شرایط خشکی، ترکیبات شیمیایی گیاهان از جمله قند، پروتئین و میزان کلروفیل می‌توانند در راستای افزایش مقاومت به تنش خشکی تغییر کنند. علاوه‌بر این، تنش خشکی نه‌تنها راندمان تولید را کاهش می‌دهد، بلکه فرسایش خاک و همچنین تخریب محیط‌زیست را نیز به همراه دارد (Guerrini et al., 2020; Bhandari et al., 2020). فتوسنتز مهم‌ترین فرآیند شیمیایی روی زمین است. همچنین یک فرآیند فیزیولوژیکی کلیدی در رشد و نمو محصولات کشاورزی محسوب می‌شود و به‌شدت تحت تأثیر تنش خشکی قرار دارد (Han et al., 2023). کلروفیل به‌عنوان مهم‌ترین و مؤثرترین رنگدانه در فتوسنتز می‌تواند منعکس‌کننده وضعیت رشد گیاهان و میزان تنش باشد. برای ارزیابی اثر تنش خشکی بر فتوسنتز گیاه از شاخص‌های فلورسانس کلروفیل استفاده می‌شود. در واقع، ارزیابی فلورسانس کلروفیل تخمینی از نحوه عملکرد فتوسنتز است. فلورسانس کلروفیل، مؤلفه‌های مختلفی دارد که با ارزیابی آن‌ها می‌توان فعالیت فتوسیستم I و II را مورد بررسی قرار داد. با افزایش فلورسانس کلروفیل در شرایط تنش خشکی، کارآیی فتوسنتز کاهش می‌یابد. بنابراین ارزیابی فلورسانس کلروفیل می‌تواند برای تعیین وضعیت فیزیولوژی گیاه و آسیب به سازوکار فتوسنتزی استفاده شود (Wasaya et al., 2021; Yan et al., 2021). فتوسنتز یکی از اصلی‌ترین فرآیندهای متابولیکی است که بر بازده غلات تأثیر می‌گذارد. بنابراین فعالیت فتوسنتز خالص و محتوای کلروفیل، شاخص‌های مهم سازگاری گندم با تنش گرما و سایر عوامل تنش‌زای غیرزنده هستند (Bhandari et al., 2021). لذا ارائه راهکارهایی جهت مقابله با اثرات منفی ناشی از تنش خشکی با حفظ و یا کاهش کمتر عملکرد محصول، امری بسیار ضروری است.

یکی از راهکارهای مقابله با تنش خشکی، کاربرد عناصر ریزمغذی است. محققان اظهار داشتند که استفاده از کودهای ریزمغذی می‌تواند نتایج قابل توجهی در رابطه ویژگی‌های عملکرد و افزایش دسترسی به مواد مغذی و تأثیر بر شاخص‌های فیزیولوژیکی محصول داشته باشد. همچنین کاربرد عناصر ریزمغذی باعث افزایش عملکرد محصول و بهبود اثربخشی استفاده از عناصر پرمصرف در گیاه می‌شود (Saquee et al., 2023). برخی عناصر غذایی کم‌مصرف همانند روی و آهن، برای رشد گیاه ضروری هستند و در فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، تولید هورمون‌های رشد و تشکیل کلروفیل دخالت دارند و کمبود آن‌ها می‌توانند موجب عدم توازن عناصر غذایی در گیاه و در نهایت کاهش کمّی و کیفیت محصول شود (Hayyawi et al., 2020; Mohammed Al-Toki & Halloul, 2021). پژوهشگران اظهار داشتند که کاربرد روی موجب افزایش عملکرد و کارآیی فتوسنتز گندم نسبت به شاهد شد و اثرات منفی ناشی از تنش خشکی را کاهش داد (Anwar et al., 2021). سلنیوم یکی دیگر از ریزمغذی‌ها است که به‌دلیل حضور در سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی و تعادل هورمونی به‌عنوان یک عنصر مهم برای گیاه شناخته شده است (Titov et al., 2022). همچنین سازوکارهای محافظتی سلنیوم در گیاهان در برابر تنش‌ها از طریق تنظیم فعالیت آنزیمی گیاهان و افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی آنتوسیانین‌ها، فلاونوئیدها و ترکیبات فنلی است. این سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، خسارت اکسیداتیو ناشی از تنش را کاهش می‌دهند. علاوه‌بر این، سلنیوم می‌تواند فتوسنتز گیاهان را با افزایش کارآیی فتوسیستم، افزایش فلورسانس کلروفیل و کاهش تخریب غلظت کلروفیل بهبود بخشد. سلنیوم به تنظیم وضعیت آب در گیاهان با ارتقای راندمان جذب آب از ریشه و کاهش از دست دادن آب از بافت‌ها کمک می‌کند و باعث تحریک رشد گیاه با ارتقای یکپارچگی سیستم غشایی می‌شود که منجر به ازدیاد طول ریشه و ساقه و تجمع زیست‌توده می‌شود (Raza et al., 2020; Li et al., 2022). محققان گزارش کردند که کاربرد سیتوکینین باعث بهبود رشد گیاه، کاهش اثرات سوء گونه‌های فعال اکسیژن و افزایش انتقال مواد جذب‌شده به دانه‌ها در شرایط تنش خشکی می‌شود (Raza et al., 2020). علاوه‌بر این گزارش شد که کاربرد ۱۰۰ میکرومولار سیتوکینین موجب افزایش به‌ترتیب ۴/۳۶ درصد، ۷/۲۱ درصد و ۵/۵۵ درصد عملکرد دانه گندم در زمان اعمال خشکی در مراحل پنجه‌زنی، گرده‌افشانی و پُر شدن دانه شد. سیتوکینین موجب افزایش سایر شاخص‌های فیزیولوژیکی شامل سرعت فتوسنتز، شاخص سطح برگ و محتوای کلروفیل شد. سیتوکینین رشد گیاه را بهبود بخشید، اثرات نامطلوب گونه‌های فعال اکسیژن را به حداقل رساند و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها را در شرایط خشکسالی افزایش داد (Raza et al., 2020). با توجه به کاربرد سیتوکنین و ریزمغذی‌ها بر کاهش اثرات حاصل از تنش خشکی، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی توأم محلول‌پاشی هورمون سیتوکنین و ریزمغذی‌ها در شرایط تنش خشکی بر فلورسانس کلروفیل و عملکرد گندم در شرایط آب‌وهوایی دو منطقه کرج و همدان اجرا شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به‌صورت اسپلیت‌پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو منطقه کرج و همدان طی سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ بر روی گندم (*Triticum aestivum* L.) اجرا شد. تاریخ کاشت در منطقه کرج ۱۷ مهرماه و در همدان ۱۴ مهرماه بود. اطلاعات هواشناسی مربوط به سال زراعی از ایستگاه سینوپتیک هر دو منطقه در جدول ۱ ارائه شده است. تیمارهای آزمایش شامل رژیم آبیاری با سه سطح (آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل

دسترس در تمام دوره رشدی (شاهد)، آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی (معادل کد ۶۹ براساس مقیاس BBCH) و آبیاری در ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس تا پایان دوره رشد، آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و قطع آبیاری تا پایان دوره رشد)، که در کرت‌های اصلی قرار گرفت و عامل دوم عناصر نانو کم‌مصرف با پنج سطح شامل روی، آهن، سلنیوم، ترکیب سه عنصر و شاهد (عدم مصرف عناصر ریزمغذی نانو) و زمان استفاده از سیتوکینین با چهار سطح شامل مصرف در مرحله گل‌دهی، مصرف در مرحله شیری شدن و مصرف در مرحله گل‌دهی + شیری شدن و شاهد (عدم مصرف)، که به‌صورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی قرار گرفت.

جدول ۱- اطلاعات هواشناسی در دو منطقه همدان و کرج

Table 1- Meteorological information in Hamadan and Karaj regions

ماه‌های کشت Cultivation months	رطوبت Humidity (%)		بارندگی Precipitation (mm)		حداکثر دما Maximum temperature (C)		حداقل دما Minimum temperature (C)	
	همدان Hamadan	کرج Karaj	همدان Hamadan	کرج Karaj	همدان Hamadan	کرج Karaj	همدان Hamadan	کرج Karaj
مهر October	40	43	162.2	130.5	18	25	5	7
آبان November	39	44	151.5	128.5	14	20	1	2
آذر December	42	45	141.5	83	13	18	-2	-1
دی January	43	42	143.5	97.5	10	14	-4	-3.2
بهمن February	44	41	117.5	145.2	11	12	-7.5	-3.5
اسفند March	41	54	124.5	105.5	14	13.3	-1	1
فروردین April	38	48	121.2	97	16	15.5	3	5
اردیبهشت May	42	42	112.6	104.5	16.5	19	9	11
خرداد June	43	46	0	0	23.5	29.3	14	18

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 2- Some physical and chemical properties of soil

منطقه Region	هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})	pH	نیترات NO_3 (mg kg^{-1})	پتاسیم K (mg.kg^{-1})	مواد آلی Organic matter (%)	فسفر (mg kg^{-1})	سدیم Na (meq l^{-1})	بافت Texture
همدان Hamadan	1.14	7.67	7.44	509.12	0.81	13.12	6.83	لومی رسی Clay loam
کرج Karaj	2.26	8.07	8.11	411.27	0.19	8.32	7.11	رسی Clay

عملیات اجرایی در مهرماه سال ۱۳۹۸ با کشت بذر در مناطق کرج و همدان، با تراکم ۴۰۰ بذر در مترمربع آغاز گردید. عملیات آماده‌سازی زمین در هر منطقه شامل شخم عمیق، دیسک و تسطیح لازم در پاییز بود. قبل از آماده‌سازی نهایی زمین، نمونه‌برداری مرکب خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری انجام و نسبت به تعیین میزان عناصر غذایی موجود در آن اقدام گردید (جدول ۲). زمان آبیاری به‌وسیله بلوک گچی براساس تخلیه رطوبتی زمین مشخص و اجرا شد. بلوک‌ها قبلاً در مزارع تحت کشت مورد آزمایش واسنجی قرار گرفته بودند. برای محاسبه میزان آب آبیاری در هر نوبت، از روش اندازه‌گیری محتوای رطوبت خاک استفاده شد. بدین منظور، قبل از هر آبیاری، رطوبت خاک به‌وسیله دستگاه تی.دی.آر اندازه‌گیری گردید و حجم آب مورد نیاز در تیمار آبیاری کامل، براساس اختلاف بین

رطوبت خاک و حد ظرفیت زراعی برآورد گردید. با توجه به مساحت هر کرت، حجم آب آبیاری در هر نوبت براساس منحنی تخلیه رطوبتی قابل دسترس که از قبل به دست آمده بود، محاسبه شد (Paknejad et al., 2007). هورمون سیتوکنین با غلظت ۷۰ میکرومولار از شرکت سازنده Alpha Chemika تهیه شد. نانو کود روی با غلظت ۲/۵ در هزار و نانو کود آهن با غلظت ۲ در هزار و سلنیوم به‌میزان ۲۰ گرم در هکتار در دو مرحله ساقه‌دهی و سنبله مورد استفاده قرار گرفتند. در حالت ترکیب کودها نیز همان مراحل اعمال شد. شرکت کود نانو روی ۱۲ درصد خضرا شماره ثبت کودی ۲۹۹۳۶ و شرکت کود نانو آهن ۹ درصد خضرا شماره ثبت کودی ۳۴۴۲۸ بود. محلول استوک نانو سلنیوم ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر از شرکت Nanosany خراسان رضوی تهیه گردید.

قبل از کشت، کود نیتروژن از منبع اوره محاسبه و با توجه به خاک مزرعه و براساس توصیه‌های متخصص تغذیه برمبنای آزمون خاک در هر دو منطقه به‌میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار استفاده شد و به‌مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل قبل از کاشت در مرحله آماده‌سازی زمین، به‌صورت یکنواخت در مزرعه پخش شد و با دیسک به‌عمق حدود ۱۵ سانتی‌متری خاک مخلوط شد. رقم بذر گندم استفاده‌شده SHS ۰۲۲ بود و از مرکز تحقیقات کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی کرج تهیه شد. این رقم از دورگ‌گیری بین گندم میراکل و ارقام روسی ایجاد شده است. لاین حاصل توسط اشعه گاما موتاسیون شده و سلکسیون صورت گرفت. ساقه‌ها نسبت به ارقام معمولی پُرتر بوده و دارای یک سنبله اصلی و ۱۰–۵ سنبله فرعی منشعب از سنبله اصلی بوده و رنگدانه آن قرمز می‌باشد. این رقم دارای تیپ رشد پاییزه بوده و مناسب مناطق سردسیر است. همچنین این رقم مقاوم به زنگ زرد، امّا به خوابیدگی حساس است. روش کشت به‌صورت جوی و پشته‌ای توسط دستگاه کارنده غلات و با فاصله ۱۵ سانتی‌متر انجام شد، به‌طوری که فاصله هر پشته ۶۰ سانتی‌متر برای آبیاری بود که هر پشته شامل چهار خط کشت ۱۵ سانتی‌متری و هر کرت شامل سه پشته و در مجموع ۱۲ خط کشت به‌طول شش متر بود. به‌طوری که بین کرت‌های فرعی ۶۰ سانتی‌متر و بین کرت‌های اصلی ۱۸۰ سانتی‌متر فاصله بود. تاریخ برداشت در کرج ۱۹ تیرماه و در همدان ۲۵ تیرماه بود. صفاتی نظیر عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، شاخص کلروفیل، محتوای رطوبت نسبی برگ و شاخص‌های فلورسانس اندازه‌گیری شدند. جهت نمونه‌برداری عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه، خط شماره ۱ و خط شماره ۱۲ و همچنین نیم‌متر از بالا و نیم‌متر از پایین کرت به‌عنوان حاشیه حذف و عملیات نمونه‌برداری از خطوط ۲ و ۴ انجام شد. در زمان ۲۰ روز بعد از گل‌دهی، شاخص کلروفیل (عدد اسپد) با استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر (SPAD) اندازه‌گیری شد. دستگاه کالیبره گردید و سپس کار قرائت را از سه نقطه از هر برگ انجام و بعد میانگین سه نقطه در نظر گرفته شد (Minolta, 1989). میزان محتوای رطوبت نسبی ۲۰ روز بعد از گل‌دهی (معادل کد ۶۵ براساس مقیاس BBCH)، از طریق رابطه (۱) محاسبه شد (Ferrat & Loval, 1999).

$$RWC=\frac{FW-DW}{SW-DW}\times 100 \qquad (۱)$$

که در آن، FW: وزن‌تر برگ، DW: وزن خشک برگ و SW: وزن اشباع برگ است. شاخص‌های فلورسانس در مزرعه شامل فلورسانس اولیه (F_0)، حداکثر فلورسانس در تاریکی (F_m)، پتانسیل عملکرد کوانتوم (F_v/F_m)، حداکثر فلورسانس در روشنایی ($F_{m'}$)، افت فتوشیمیایی فلورسانس (QP) و افت غیرفتوشیمیایی فلورسانس (Q_n) به‌وسیله Portable Fluorescence Analyzer (PAM 2000, Waltz, Germany) اندازه‌گیری شدند (جدول ۳). اندازه‌گیری‌ها ۲۰ روز بعد از گل‌دهی (معادل کد ۶۵ براساس مقیاس BBCH) از ساعت ۷ تا ۱۰ صبح انجام شد. برای اندازه‌گیری، ابتدا گیره‌ها را بر روی پهنک برگ قرار داده و منفذ میانی گیره‌ها بسته شدند تا عمل سازگاری با تاریکی به مدت نیم ساعت و با تابیدن نور قرمز (۶۹۵ نانومتر) انجام شد. دستگاه به کار برده‌شده، نور با طول موج ۷۱۰ نانومتر را بازتاب می‌کند. پس از تاریک‌سازی، ابتدا گیره‌ها را به دستگاه فلورومتر وصل و سپس منفذ میانی گیره به‌منظور ورود نور به محفظه تاریک باز شد. بلافاصله دکمه روی دستگاه فلورومتر فشار داده شد تا شاخص‌های فلورسانس کلروفیل اندازه‌گیری و ثبت شود (Baker & Rosenquist, 2004). این دستگاه توانایی تخمین میزان آسیب‌های وارده در اثر تنش خشکی وارده به فتوسیستم II را دارا می‌باشد، به‌طوری که با این ابزار کارآیی فتوشیمیایی فتوسیستم II اندازه‌گیری می‌شود (Li et al., 2010).

پس از انجام آزمون بارتلت (Bartlett, 1937) جهت اطمینان از همگن بودن واریانس خطاهای آزمایشی، تجزیه مرکب داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام و مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن با احتمال خطای پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر منطقه، رژیم‌های آبیاری، عناصر ریزمغذی و سیتوکینین بر عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه با احتمال خطای یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که عملکرد بیولوژیک ۲۲/۷۹ درصد و عملکرد دانه ۲۰/۷۳ درصد در منطقه همدان بیشتر از کرج بود.

جدول ۳- مؤلفه‌های اندازه‌گیری‌شده فلورسانس کلروفیل و معادلات مربوط به آن‌ها

Table 3- Measured components of chlorophyll fluorescence and their corresponding equations

شاخص‌ها Parameters	مخفف Abbreviation	معادله Equation
فلورسانس متغیر Variable fluorescence	Fv	Fm-Fo
حداکثر کارآیی کوانتومی فتوسیستمII Maximum photochemical quantum yield of photosystem II	Fv/Fm	(Fm-Fo)/Fm
کارآیی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II Effective photochemical quantum yield of photosystem II	Y(II)	(Fm-Ft)/ Fm´
کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم‌شده فتوسیستم II Quantum yield of regulated energy dissipation	Y(NPQ)	(Ft/ Fm´)-(Ft/Fm)
کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II Quantum yield of non-regulated energy dissipation	Y(NO)	Ft/Fm
خاموشی غیرفتوشیمیایی Non-photochemical quenching	NPQ	(Fm- Fm´)/ Fm´

(Klughammer & Schreiber, 2008).

در بین تیمارهای آبیاری، با افزایش مقدار تنش خشکی، عملکرد بیولوژیک و دانه کاهش یافت و تیمار آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال)، عملکرد بیولوژیک را ۴۸/۴۳ درصد و عملکرد دانه را ۷۰/۸۰ درصد نسبت به تیمار آبیاری نرمال تا گرده-افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری افزایش داد. در تیمارهای عناصر ریزمغذی نانو، تیمار توأم سه عنصر روی + آهن + سلنیوم سبب افزایش عملکرد بیولوژیک (۵۶/۴۷ درصد) و عملکرد دانه (۵۴/۳۹ درصد) نسبت به شاهد شد. در محلول‌پاشی سیتوکینین نیز تیمار گرده‌افشانی + شیری شدن دانه، عملکرد بیولوژیک (۶۱/۶۶ درصد) و عملکرد دانه را (۷۱/۵۶ درصد) نسبت به شاهد افزایش داد (جدول ۵). عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در منطقه همدان بیشتر از کرج بود که گمان می‌رود به علت شرایط آب‌وهوایی مناسب و همچنین به علت وجود مواد آلی بیشتر در خاک این امر رخ داده است. تأثیر شرایط آب‌وهوایی در مناطق مختلف بر گیاهان متفاوت است، این تأثیر ناشی از میزان بارندگی، نوع آب‌وهوا و میزان رطوبت نسبی هوا می‌باشد که هرکدام از این عوامل تأثیر به‌سزایی در رشد گیاهان دارد. از طرف دیگر، مواد آلی موجود در خاک در دو منطقه تحقیق متفاوت بود که از طریق رابطه آب و خاک و گیاه می‌توان به اختلاف دو منطقه و تأثیر آن بر عملکرد گیاه پی برد (Pequeno et al., 2021). تنش خشکی موجب کاهش عملکرد گندم شد. عموماً گیاهان یک‌ساله با قابلیت تولید بذر (مانند گندم) در مراحل اولیه گل‌دهی نسبت به خشکی حساس می‌باشند، چنانچه غلات در مراحل اولیه رشد زایشی تحت تنش قرار گیرند، عملکرد دانه آن‌ها به‌میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد که احتمالاً در این حالت تقسیم میوز دچار اختلال شده و تولید گرده‌های سالم کاهش می‌یابد و در نهایت عملکرد دانه تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Si et al., 2020). محققان بیان کردند که تنش خشکی در مرحله پنجه‌زنی، عملکرد بیولوژیک و دانه گندم را کاهش داد و کاربرد سیتوکینین موجب افزایش عملکرد گندم شد، که با نتایج حاصل از مطالعه حاضر مطابقت داشت (Raza et al., 2020). همچنین ثابت شده است که تنش خشکی در طول گل‌دهی و پُر شدن‌دانه می‌تواند عملکرد گندم را به‌شدت کاهش دهد (Farooq et al., 2014). علاوه‌بر این، تنش خشکی ساختار کلروپلاست را مختل می‌کند، فعالیت آنزیم‌های کلیدی مرتبط با فتوسنتز را کاهش می‌دهد و منجر به کاهش ظرفیت فتوسنتزی می‌شود و بر توزیع و انتقال مواد فتوسنتزی تأثیر می‌گذارد و در نهایت منجر به کاهش عملکرد می‌شود (Castañeda-Murillo et al., 2022). کاربرد سیتوکینین عملکرد گندم را بهبود بخشید. سیتوکینین باعث افزایش زئاتین ریبوزید و تولید ایندول استیک اسید[1] می‌شود، بنابراین به کاهش تنش خشکی کمک می‌کند (Yang et al., 2021). عناصر ریزمغذی نقش اساسی را در رشد و عملکرد دانه گندم ایفا می‌کنند. کود نانو دارای سطح وسیع و اندازه ذرات کمتری نسبت به اندازه منافذ برگ گیاه است که به بافت‌های گیاه بهتر نفوذ کرده و باعث جذب بهتر مواد مغذی می‌شود و با ایجاد شرایط مناسب برای رشد گندم سبب بهبود رشد گیاه و در نهایت منجر به افزایش عملکرد بیولوژیک و دانه می‌شود (Dimkpa & Bindraban, 2016). سلنیوم از طریق تحریک رشد ریشه، افزایش جذب آب ریشه‌ها و فراهمی بالاتر رطوبت خاک موجب افزایش عملکرد به‌خصوص در شرایط کاربرد توأم با عناصر آهن و روی شده است. گزارش شده است که محلول‌پاشی سلنیوم، ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت نگهداری آب در خاک، جذب، نگهداری و انتقال عناصر در گیاه را افزایش می‌دهد. اثر مثبت سلنیوم بر عملکرد گندم می‌تواند به علت فراهمی نیتروژن و جلوگیری از آب‌شویی آن نسبت داده شود (Jameson & Song, 2016).

1- IAA

جدول ٤- نتایج تجزیه واریانس صفات عملکرد، رطوبت نسبی برگ، شاخص کلروفیل و برخی شاخص‌های فلورسانس کلروفیل گندم

Table 4- Analysis variance results of yield traits, leaf relative humidity, chlorophyll index and some chlorophyll fluorescence parameters of wheat

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares						
		عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Grain yield	رطوبت نسبی برگ RWC	شاخص کلروفیل Chlorophyll index	فلورسانس کمینه F0	فلورسانس بیشینه Fm	فلورسانس بیشینه در حالت اشباع Fm´
منطقه Place (P)	1	964.75**	364.97**	159.66**	95.42**	72.83**	174.83**	135.79**
تکرار در منطقه Replication in P	4	13.11	10.84	12.32	16.58	12.43	16.48	4.33
آبیاری Irrigation (I)	2	673.94**	419.11**	167.01**	117.70**	53.76**	208.65**	367.17**
P ×I	2	19.72^{ns}	32.70^{ns}	19.43^{ns}	11.36^{ns}	9.88^{ns}	10.74^{ns}	16.59^{ns}
خطا Error	8	28.70	21.56	21.67	17.93	10.17	12.70	13.18
عناصر ریزمغذی Nano-micronutrients (B)	4	751.19**	358.72**	189.73*	96.88*	69.07*	113.52*	10.14*
P ×B	4	12.70^{ns}	15.74^{ns}	5.26^{ns}	8.52^{ns}	3.26^{ns}	5.70^{ns}	2.52^{ns}
سیتوکینین Cytokinin (C)	3	515.83**	276.30**	109.56**	83.66**	83.34*	74.92*	15.62*
P ×C	3	14.61^{ns}	19.47^{ns}	8.84^{ns}	9.43^{ns}	6.05^{ns}	7.05^{ns}	1.10^{ns}
I×B	8	20.73^{ns}	10.53^{ns}	9.23^{ns}	8.12^{ns}	5.81^{ns}	3.78^{ns}	2.58^{ns}
P× I×B	8	23.84^{ns}	42.11^{ns}	13.48^{ns}	11.52^{ns}	6.39^{ns}	6.09^{ns}	3.21^{ns}
I×C	6	15.66^{ns}	38.05^{ns}	10.74^{ns}	12.89^{ns}	5.24^{ns}	5.64^{ns}	2.33^{ns}
P× I×C	6	16.32^{ns}	22.91^{ns}	12.01^{ns}	11.03^{ns}	7.42^{ns}	6.85^{ns}	2.18^{ns}
B×C	12	19.87^{ns}	15.34^{ns}	10.95^{ns}	11.46^{ns}	6.60^{ns}	4.28^{ns}	1.35^{ns}
P× B×C	12	26.40^{ns}	19.56^{ns}	13.18^{ns}	12.58^{ns}	7.18^{ns}	3.12^{ns}	2.67^{ns}
I×B×C	24	11.71^{ns}	26.27^{ns}	14.58^{ns}	10.73^{ns}	6.27^{ns}	3.58^{ns}	1.12^{ns}
P× I×B×C	24	15.46^{ns}	23.48^{ns}	16.73^{ns}	12.34^{ns}	5.90^{ns}	2.97^{ns}	1.19^{ns}
خطا Error	228	21.19	15.80	12.46	14.94	8.21	10.22	7.89
ضریب تغییرات C.V		11.7	13.4	10.5	13.6	10.1	8.4	5.6

** و *: به‌ترتیب معنی‌دار با احتمال خطای یک و پنج درصد، ns: فاقد اثر معنی‌دار.

* and **: significant at 5% and 1% levels of probability, respectively. ns: not significant.

رطوبت نسبی برگ و شاخص کلروفیل

اثر منطقه، آبیاری، عناصر ریزمغذی و اثر سیتوکینین با احتمال خطای یک درصد بر رطوبت نسبی برگ و شاخص کلروفیل معنی‌دار شد (جدول ۴). مطابق با نتایج مقایسه میانگین، رطوبت نسبی برگ و شاخص کلروفیل به‌ترتیب ۱۱/۳۱ درصد و ۲۶/۶۷ درصد در همدان بیشتر از کرج بود. با اعمال تنش خشکی، رطوبت نسبی برگ و شاخص کلروفیل کاهش یافت. تیمار آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال) موجب افزایش رطوبت نسبی برگ ۴۰/۷۸ درصد و شاخص کلروفیل ۸۰/۴۴ درصد نسبت به تیمار آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری شد. در تیمارهای عناصر ریزمغذی نانو، تیمار توأم سه عنصر روی + آهن + سلنیوم سبب بهبود رطوبت نسبی برگ ۴۰/۰۴ درصد و شاخص کلروفیل ۸۷/۶۷ درصد نسبت به شاهد شد. در محلول‌پاشی سیتوکینین نیز تیمار گرده‌افشانی + شیری شدن دانه سبب افزایش رطوبت نسبی برگ ۲۷/۹۸ درصد و شاخص کلروفیل ۶۲/۹۷ درصد نسبت به شاهد گردید (جدول ۵). باید توجه داشت که عدد کلروفیل‌متر مقدار کلروفیل را مشخص نمی‌کند، بلکه تخمینی از غلظت کلروفیل را نشان می‌دهد. این عدد همبستگی بالایی با مقدار کلروفیل برگ دارد. فتوسنتز یک سیستم تبدیل انرژی و متابولیک حیاتی در رشد و نمو محصولات کشاورزی است.

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین صفات عملکرد، رطوبت نسبی برگ، شاخص کلروفیل و برخی شاخص‌های فلورسانس کلروفیل گندم

Table 5- Results of comparison of average yield traits, leaf relative humidity, chlorophyll index and some chlorophyll fluorescence parameters of wheat

تیمارها Treatments	عملکرد بیولوژیک Biological yield (t ha^{-1})	عملکرد دانه Grain yield (t ha^{-1})	رطوبت نسبی برگ RWC (%)	شاخص کلروفیل Chlorophyll index	فلورسانس کمینه F_0	فلورسانس بیشینه F_m	فلورسانس بیشینه در حالت اشباع $F_{m'}$
منطقه Place							
همدان Hamadan	27.58^{a*}	10.83^{a}	70.65^{a}	34.86^{a}	21.69^{a}	9.65^{a}	55.72^{a}
کرج Karaj	22.46^{b}	8.97^{b}	63.47^{b}	27.52^{b}	17.80^{b}	7.43^{b}	51.67^{b}
آبیاری Irrigation							
I_1	26.48^{a}	11.29^{a}	74.53^{a}	34.79^{a}	23.75^{a}	10.42^{a}	58.49^{a}
I_2	23.05^{b}	8.73^{b}	68.81^{b}	25.54^{b}	16.93^{b}	8.38^{b}	43.17^{b}
I_3	17.84^{c}	6.61^{c}	52.94^{c}	19.28^{c}	14.26^{c}	6.64^{b}	48.72^{c}
ریزمغذی Micronutrients							
روی + آهن + سلنیوم Zinc + iron + selenium	29.01^{a}	11.78^{a}	72.43^{a}	33.97^{a}	22.87^{a}	9.61^{a}	57.24^{a}
روی Zinc	26.18^{b}	10.23^{b}	66.89^{b}	29.48^{c}	21.56^{b}	7.75^{b}	52.82^{b}
آهن Iron	25.95^{b}	10.51^{b}	62.45^{c}	32.85^{b}	20.31^{b}	7.94^{b}	52.35^{b}
سلنیوم Selenium	25.42^{b}	9.02^{c}	59.33^{d}	26.73^{d}	20.45^{b}	7.38^{b}	52.98^{b}
شاهد Control	18.54^{c}	7.63^{d}	51.72^{e}	18.10^{e}	15.68^{c}	6.03^{c}	48.27^{c}
سیتوکینین Cytokinin							
گل‌دهی + شیری شدن Flowering stage + milking development	28.42^{a}	12.25^{a}	73.21^{a}	31.52^{a}	22.61^{a}	10.11^{a}	52.48^{a}
مرحله شیری شدن Milking	25.73^{b}	10.31^{b}	66.45^{b}	28.49^{b}	20.28^{b}	8.62^{b}	50.69^{b}
مرحله گل‌دهی Anthesis	21.96^{c}	8.66^{c}	61.84^{c}	22.67^{c}	17.95^{c}	6.84^{c}	48.15^{c}
شاهد Control	17.58^{d}	7.14^{d}	57.20^{d}	19.34^{d}	15.63^{d}	6.32^{c}	47.37^{c}

* در هر ستون و برای هر عامل، میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار هستند (آزمون دانکن با احتمال خطای پنج درصد)

* Means with similar letters in each column and each factors are not significantly different at 5% probability level.

I_1: شاهد، I_2: آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن آبیاری در ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس، I_3: آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری

I_1: normal irrigation, I_2: normal irrigation from planting date to pollination stage and irrigation at 60% available moisture discharge afterward, I_3: normal irrigation in from planting date to pollination stage then with holding cut off irrigation

افزایش ظرفیت فتوسنتزی برای ایجاد پایه و اساس رشد گیاه، تجمع ماده خشک و پُر شدن دانه که اساس تشکیل عملکرد محصول هستند، حائز اهمیت است(Lai et al., 2024). به نظر می‌رسد که کاهش کلروفیل در اثر تنش خشکی به علت افزایش تولید رادیکال‌های اکسیژن باشد، که این رادیکال‌های آزاد سبب پراکسیداسیون و در نتیجه تجزیه رنگیزه می‌شوند. بر اثر تنش خشکی، محتوای

رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل‌های a و b) در برگ‌ها کاهش می‌یابد. شرایط تنش خشکی گیاه، اثرات مهمی بر کلروفیل دارد و تنش خشکی از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های کلروفیلاز و پراکسیداز در گیاهان منجر به تخریب کلروپلاست و کاهش محتوای کلروفیل می‌شود. کاهش میزان کلروفیل به‌دلیل تنش خشکی با افزایش رادیکال‌های اکسیژن در سلول‌ها مرتبط است (Askari et al., 2017). نتایج مطالعات سایر محققان نشان داد که تنش خشکی به‌طور قابل توجهی محتوای کلروفیل را کاهش داد و منجر به تولید اکسیژن فعال شد که با اجزای مختلف سلولی به‌ویژه لیپیدهای غشایی واکنش می‌دهد و به غشاهای فتوسنتزی آسیب می‌رساند و مهار نوری را تشدید می‌کند(Kruk & Szymaúska,) 2021; Hlahla et al., 2024. عناصر ریزمغذی سبب افزایش کلروفیل شدند. آهن در سنتز کلروفیل نقش به‌سزایی دارد و می‌توان گفت که علت افزایش کلروفیل، نقش آهن در تولید و ساخت اجزای کلروپلاست و به‌ویژه انتقال الکترون است. آهن به‌عنوان جزئی از گروه کاتالیزوری بسیاری از آنزیم‌های اکسیداسیون و احیا که در فتوسنتز، تنفس و تثبیت نیتروژن نقش دارند، اهمیت دارد (Adil et) (al., 2022. محتوای نسبی آب برگ، شاخص مناسبی برای بیان وضعیت آبی گیاه است و در واقع به‌عنوان شاخصی برای نشان دادن آسیب‌های ناشی از تنش خشکی معرفی شده است. محتوای نسبی آب بیشتر باعث افزایش میزان فتوسنتز و در نتیجه افزایش عملکرد در شرایط تنش می‌شود. حفظ محتوای آب نسبی برگ به‌معنای توانایی برگ در حفظ مقادیر بیشتری آب در شرایط تنش است که از طریق قابلیت تنظیم اسمزی و یا توانایی ریشه در جذب آب حاصل می‌شود (Cappelli et al., 2020). در پژوهش حاضر نیز در شرایط کمبود آب و قطع آبیاری، رطوبت نسبی برگ‌ها کاهش پیدا کرد. کاهش محتوای آب نسبی برگ و بسته شدن روزنه‌ها، اولین تأثیر تنش خشکی بوده که از طریق اختلال در سیستم ساخت مواد فتوسنتزی موجب کاهش میزان عملکرد می‌شود. تحت شرایط تنش خشکی، گیاه روزنه‌های خود را می‌بندد. در نتیجه، میزان دی‌اکسید کربن درون سلولی کاهش می‌یابد که این امر منجر به کاهش میزان فشار آماس در اثر کاهش فتوسنتز در برگ می‌شود Wasaya et al.,) (2021. گزارش شد که عناصر ریزمغذی آهن، روی و مس موجب افزایش رطوبت نسبی برگ و کلروفیل گندم شد که نتایج حاضر با پژوهش سایر محققان مطابقت داشت (Adil et al., 2022).

فلورسانس کمینه، بیشینه و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع

اثر منطقه و رژیم‌های آبیاری با احتمال خطای یک درصد، اثر عناصر ریزمغذی و سیتوکینین با احتمال خطای پنج درصد بر فلورسانس کمینه، بیشینه و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که فلورسانس کمینه (۲۱/۸۵ درصد)، فلورسانس بیشینه (۲۹/۸۷ درصد) و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع (۷/۸۳ درصد) در منطقه همدان بیشتر از کرج بود. در بین تیمارهای آبیاری، تیمار آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال) موجب افزایش فلورسانس کمینه (۵۲/۵۲ درصد)، فلورسانس بیشینه (۵۶/۹۲ درصد) و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع (۲۰/۰۵ درصد) نسبت به تیمار آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری شد. در تیمارهای عناصر ریزمغذی نانو، تیمار توأم سه عنصر روی + آهن + سلنیوم سبب افزایش فلورسانس کمینه (۴۵/۸۵ درصد)، فلورسانس بیشینه (۵۹/۳۶ درصد) و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع (۱۸/۵۸ درصد) نسبت به شاهد شد. در محلول‌پاشی سیتوکینین نیز تیمار گرده‌افشانی + شیری شدن دانه، فلورسانس کمینه (۴۴/۶۵ درصد)، فلورسانس بیشینه (۵۹/۹۶ درصد) و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع (۱۰/۷۸ درصد) را نسبت به شاهد افزایش داد (جدول ۵). وقتی مولکول‌های کوئینون در وضعیت اکسیدشده هستند، در این حالت سیستم دارای کمترین فلورسانس (F_0) است. به‌تدریج، با افزایش درجه احیاء شدن، فلورسانس افزایش می‌یابد. این فرآیند تا احیای کامل ادامه یافته و مراکز احیای فتوسیستم II به‌تدریج بسته می‌شوند و انتقال الکترون به فتوسیستم I صورت نمی‌گیرد. در این حالت، فلورسانس کلروفیل افزایش می‌یابد و مراکز فتوسیستم دارای بیشترین فلورسانس (Fm) هستند. در واقع، تنش خشکی و افزایش شدت آن با تأثیر منفی بر ظرفیت پذیرش و انتقال الکترون باعث شد که سیستم به‌سرعت به Fm برسد. افزایش در مقدار F0 و کاهش در Fm، فعالیت فتوسیستم II را مختل می‌کند. افت Fm ممکن است با کاهش فعالیت کمپلکس آنزیم تجزیه‌کننده آب و همچنین چرخه انتقال الکترون در درون یا اطراف فتوسیستم II مرتبط باشد (Thakur et al., 2025; Paknejad et al., 2007). همراستا با نتایج حاصل از پژوهش حاضر، گزارش شده است که تنش خشکی موجب کاهش فلورسانس کمینه، بیشینه و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع گندم شده است (Ali et al., 2023). از طرف دیگر، کاربرد هورمون سیتوکینین و همچنین عناصر ریزمغذی با بهبود شرایط تغذیه‌ای و رشد گیاه سبب اثر مثبت بر ظرفیت پذیرش و انتقال الکترون شد که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت (Thakur et al., 2025). هرچه فلورسانس کلروفیل کمتر باشد، گیاهان مقاومت بیشتری به تنش نشان می‌دهند، زیرا از نور دریافتی خورشید، حداکثر استفاده را می‌نمایند و کمتر آن را بازتاب و هدر می‌دهند Sommer et al.,) (2023. همچنین پیرو نتایج حاصل از مطالعه حاضر، گزارش شده است که محلول‌پاشی روی و آهن با بهبود شرایط فتوسنتز و افزایش عملکرد گیاه موجب کاهش فلورسانس کمینه، فلورسانس بیشینه و فلورسانس بیشینه در حالت اشباع در گندم شده است (Mannan et al., 2022).

فلورسانس پایدار و متغیر

اثر منطقه، آبیاری، عناصر ریزمغذی و اثر سیتوکینین با احتمال خطای یک درصد بر فلورسانس پایدار و متغیر معنی‌دار شد (جدول ۶). مطابق با نتایج مقایسه میانگین، فلورسانس پایدار و متغیر به‌ترتیب ۷/۳۳ درصد و ۱۰/۷۲ درصد در همدان بیشتر از کرج بود. با اعمال تنش خشکی، رطوبت فلورسانس پایدار و متغیر کاهش یافت. تیمار آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال) موجب افزایش فلورسانس پایدار ۲۶/۶۸ درصد و شاخص فلورسانس متغیر ۲۴/۷۸ درصد نسبت به تیمار آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری شد. در تیمارهای عناصر ریزمغذی نانو، تیمار توأم سه عنصر روی + آهن + سلنیوم سبب بهبود فلورسانس پایدار ۲۶/۱۶ درصد و فلورسانس متغیر ۲۱/۴۸ درصد نسبت به شاهد شد. در محلول‌پاشی سیتوکینین نیز تیمار گرده‌افشانی + شیری شدن دانه، فلورسانس پایدار ۱۵/۳۴ درصد و فلورسانس متغیر ۲۰/۷۴ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (جدول ۷). بهبود فتوسنتز به‌واسطه مصرف سیتوکینین و عناصر ریزمغذی تحت تنش ممکن است به‌دلیل اثر این مواد در حفظ کلروفیل برگ باشد. به نظر می‌رسد که سیتوکینین و عناصر ریزمغذی دارای اثرات بازدارنده‌ای بر کارکرد دستگاه فتوسنتز باشد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان چنین استنباط نمود که کاهش میزان عملکرد کوانتوم فتوسیستم II عمدتاً به‌خاطر وقوع آشفتگی در کروپلاست بوده و کاهش کلروفیل نیز این موضوع را تأیید می‌کند، زیرا فلورسانس کلروفیل به‌طور مستقیم به فعالیت کلروفیل در واکنش فتوسیستم‌ها ارتباط داشته و می‌توان از آن به‌عنوان معیاری برای اندازه‌گیری کارآیی فتوسیستم نام برد. در مطالعه حاضر با افزایش شدت تنش خشکی، مقدار فلورسانس متغیر (F_v) کاهش یافت. اصولاً هنگامی که پذیرندهٔ الکترون (کوئینون) در حالت احیا باشد، مقدار فلورسانس کلروفیل زیاد است و به این علت مقدار F_v نیز در این حالت زیاد می‌شود؛ ولی زمانی که کوئینون در حالت اکسید است، مقدار فلورسانس کلروفیل a کم می‌شود؛ در نتیجه، میزان F_v کاهش می‌یابد. تنش‌های محیطی، مقدار F_v را به علت ممانعت از فتواکسیداسیون فتوسیستم II کاهش می‌دهد. ازآنجاکه فلورسانس متغیر F_v نشان‌دهنده احیای کامل پذیرندهٔ الکترون Q_A است؛ بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که تنش خشکی در انتقال الکترون به فتوسیستم I اختلال ایجاد کرده است (Katherine et al., 2023; Paknejad et al., 2007). در همین راستا، پژوهشگران اعلام کردند که تنش خشکی موجب کاهش فلورسانس پایدار و متغیر شد که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت (Thakur et al., 2025).

کارآیی کوانتومی فتوسیستم

اثر آبیاری، عناصر ریزمغذی و اثر سیتوکینین با احتمال خطای یک درصد بر فلورسانس پایدار و متغیر معنی‌دار شد (جدول ۶). با اعمال تنش خشکی و افزایش شدت آن، حداکثر کارآیی کوانتومی فتوسیستم II، کاهش یافت. تیمار آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال) موجب افزایش حداکثر کارآیی کوانتومی فتوسیستم II (۱۷/۱۰ درصد) نسبت به تیمار آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری شد. در تیمارهای عناصر ریزمغذی نانو، تیمار توأم سه عنصر روی + آهن + سلنیوم موجب افزایش حداکثر کارآیی کوانتومی فتوسیستم II (۲۰/۸۳ درصد) نسبت به شاهد شد. در محلول‌پاشی سیتوکینین نیز تیمار گرده‌افشانی + شیری شدن دانه و همچنین تیمار مرحله شیری شدن سبب افزایش حداکثر کارآیی کوانتومی فتوسیستم II (۱۶ درصد) نسبت به شاهد و تیمار مرحله گل‌دهی شد (جدول ۷). علاوه‌بر این، نتایج بیانگر آن است که اعمال تنش خشکی و افزایش شدت آن سبب افزایش کارآیی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II، کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم‌شده فتوسیستم II، کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II و خاموشی غیرفتوشیمیایی نسبت به آبیاری نرمال شد. تیمار آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری سبب افزایش کارآیی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II (۴۸/۵۷ درصد)، کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم‌شده فتوسیستم II (۴۵/۸۴ درصد)، کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II (۵۳/۳۳ درصد) و خاموشی غیرفتوشیمیایی (۸۱/۲۵ درصد) نسبت به تیمار آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال) شد. در بین تیمارهای عناصر ریزمغذی نانو، شاهد موجب افزایش کارآیی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II (۷۰/۹۶ درصد)، کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم‌شده فتوسیستم II (۳۴/۲۱ درصد)، کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II (۶۲/۵ درصد) و خاموشی غیرفتوشیمیایی (۶۴/۳۲ درصد) نسبت به تیمار توأم سه عنصر روی + آهن + سلنیوم شد. در بین تیمارهای سیتوکینین نیز تیمار شاهد موجب افزایش کارآیی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II (۷۲/۴۱ درصد)، کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم‌شده فتوسیستم II (۳۷/۱۴ درصد)، کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II (۵۶/۲۵ درصد) و خاموشی غیرفتوشیمیایی (۴۷/۵۶ درصد)، نسبت به تیمار محلول‌پاشی سیتوکینین گرده‌افشانی + شیری شدن دانه شد (جدول ۷). هرچه میزان ساخت کلروفیل کمتر باشد، برگ‌ها نسبت به بازدارندگی نوری آسیب‌پذیرتر هستند، با توجه به نتایج حاصل از پژوهش حاضر، تنش خشکی باعث کاهش کلروفیل شد و کاربرد سیتوکینین و همچنین عناصر ریزمغذی نانو، میزان کلروفیل گندم را افزایش داد که می‌توان بیان کرد که در تیمارهای فوق، برگ‌ها آسیب‌پذیری کمتری دارند و فتوسنتز بهتری رخ داده است (Zhang et al., 2025). در تیمارهای دارای تنش خشکی، یکی

از دلایل کاهش فلورسانس و پتانسیل عملکرد کوانتوم (Fv/Fm)، افزایش بازدارندگی نوری به‌دلیل کاهش کلروفیل در این تیمارها است. تنش خشکی باعث افزایش F0 و کاهش نسبت کلروفیل فلورسانس، Fm و Fv/Fm شد. کاهش محتوای کلروفیل در تیمارهای دارای تنش نشان‌دهنده تغییرات احتمالی در PSII به‌عنوان پیامد سازوکار تطبیقی در کلروپلاست‌ها به‌دلیل قرار گرفتن در معرض تنش است. افزایش F0 و کاهش مقادیر Fv/Fm ممکن است نتیجه آسیب به مرکز واکنش PSII باشد که توانایی انتقال انرژی به مرکز واکنش را کاهش می‌دهد که نشان‌دهنده آن است که انتقال الکترون از فتوسیستم II به فتوسیستم I تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفته و کاهش یافته است. تنش خشکی باعث کاهش پایداری غشا، امّا افزایش نشت یون شد. این نتایج نشان می‌دهد که تنش خشکی تأثیر نامطلوبی بر پایداری غشاء دارد و در نتیجه سلول‌ها به‌دلیل آسیب به غشاء، نشت یون بیشتری دارند (Sandoval et al., 2024; Thakur et al., 2025).

جدول ٦- نتایج تجزیه واریانس سایر شاخص‌های فلورسانس کلروفیل گندم

Table 6- Analysis variance results of other chlorophyll fluorescence parameters of wheat

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares: فلورسانس پایدار Ft	فلورسانس متغیر Fv	حداکثر کارآیی کوانتومی فتوسیستم II Fv/Fm	کارآیی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II Y (II)	کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم‌شده فتوسیستم II Y (NPQ)	کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II Y (NO)	خاموشی غیرفتوشیمیایی NPQ
منطقه Place (P)	1	946.83**	2251.8^{ns}	1.02^{ns}	0.94^{ns}	0.26^{ns}	0.15^{ns}	1.88**
تکرار در منطقه Replication in P	4	14.67	105.72	1.67	0.33	0.45	0.13	5.96
آبیاری Irrigation (I)	2	863.64**	3264.7**	8.35**	2.56**	0.73**	0.48*	16.23**
P ×I	2	32.80^{ns}	137.82^{ns}	5.02^{ns}	0.12^{ns}	0.001^{ns}	0.12^{ns}	3.17^{ns}
خطا Error	8	21.76	97.63	2.01	0.56	0.21	0.30	4.22
عناصر ریزمغذی Nano-micronutrients (B)	4	958.17**	1823.4**	3.90*	1.72*	1.18*	0.91*	10.73*
P ×B	4	16.70^{ns}	110.79^{ns}	0.16^{ns}	0.34^{ns}	0.007^{ns}	0.027^{ns}	1.22^{ns}
سیتوکینین Cytokinin (C)	3	313.73**	2138.1**	4.98**	1.66**	0.97**	0.82*	9.75*
P ×C	3	8.14^{ns}	111.35^{ns}	0.24^{ns}	0.13^{ns}	0.005^{ns}	0.63^{ns}	0.92^{ns}
I×B	8	46.78^{ns}	91.70^{ns}	0.57^{ns}	0.008^{ns}	0.006^{ns}	0.018^{ns}	1.01^{ns}
P× I×B	8	15.09^{ns}	126.18^{ns}	0.84^{ns}	0.14^{ns}	0.002^{ns}	0.014^{ns}	1.07^{ns}
I×C	6	19.05^{ns}	97.32^{ns}	0.72^{ns}	0.21^{ns}	0.003^{ns}	0.011^{ns}	1.24^{ns}
P× I×C	6	32.80^{ns}	84.15^{ns}	0.30^{ns}	0.09^{ns}	0.005^{ns}	0.008^{ns}	1.18^{ns}
B×C	12	18.64^{ns}	114.97^{ns}	0.61^{ns}	0.03^{ns}	0.0004^{ns}	0.006^{ns}	1.02^{ns}
P× B×C	12	15.12^{ns}	101.74^{ns}	0.95^{ns}	0.02^{ns}	0.002^{ns}	0.009^{ns}	0.97^{ns}
I×B×C	24	17.64^{ns}	95.63^{ns}	0.68^{ns}	0.007^{ns}	0.0006^{ns}	0.005^{ns}	1.25^{ns}
P× I×B×C	24	21.23^{ns}	89.04^{ns}	0.23^{ns}	0.009^{ns}	0.0008^{ns}	0.007^{ns}	1.73^{ns}
خطا Error	228	16.84	91.67	1.18	0.42	0.10	0.16	2.34
C.V		8.4	10.8	9.0	5.3	7.2	6.2	7.5

** و *: به‌ترتیب معنی‌دار با احتمال خطای یک و پنج درصد، ns: فاقد اثر معنی‌دار.

* and **: significant at 5% and 1% levels of probability, respectively, ns: not significant.

جدول ۷- نتایج مقایسه میانگین سایر شاخص‌های کلروفیل گندم

Table 7- Results of comparison of other chlorophyll fluorescence parameters of wheat

تیمارها Treatments	فلورسانس پایدار Ft	فلورسانس متغیر Fv	حداکثر کارآیی کوانتومی فتوسیستم II Fv/Fm	کارآیی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II Y (II)	کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم‌شده فتوسیستم II Y(NPQ)	کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II Y (NO)	خاموشی غیرفتوشیمیایی NPQ
منطقه Place							
همدان Hamadan	487.65[a*]	1958.43[a]	0.86[a]	0.42[a]	0.34[a]	0.16[a]	2.26[a]
کرج Karaj	454.31[b]	1768.79[b]	0.87[a]	0.45[a]	0.33[a]	0.17[a]	2.35[a]
آبیاری Irrigation							
I_1	542.71[a]	2163.38[a]	0.89[a]	0.35[c]	0.37[c]	0.15[b]	2.40[c]
I_2	497.26[b]	1946.74[b]	0.86[b]	0.41[b]	0.43[b]	0.21[a]	3.18[b]
I_3	428.39[c]	1733.67[b]	0.76[c]	0.52[a]	0.54[a]	0.23[a]	4.35[a]
ریزمغذی Micronutrients							
روی + آهن + سلنیوم Zinc+ iron+selenium	550.43[a]	2179.84[a]	0.87[a]	0.31[c]	0.38[c]	0.16[c]	1.85[c]
روی Zinc	483.38[c]	1963.04[b]	0.81[b]	0.42[b]	0.43[b]	0.21[b]	2.41[b]
آهن Iron	511.07[b]	1942.55[b]	0.82[b]	0.39[c]	0.44[b]	0.22[b]	2.34[b]
سلنیوم Selenium	467.81[d]	1926.87[b]	0.80[b]	0.45[b]	0.45[b]	0.21[b]	2.28[b]
شاهد Control	436.28[e]	1794.39[d]	0.72[c]	0.53[a]	0.51[a]	0.26[a]	3.04[a]
سیتوکینین Cytokinin							
گل‌دهی + شیری شدن Flowering stage + milking development	516.94[a]	2123.64[a]	0.87[a]	0.29[d]	0.35[b]	0.16[b]	2.48[b]
مرحله شیری شدن Milking	492.35[a]	2190.21[a]	0.86[a]	0.34[c]	0.36[b]	0.17[b]	2.34[b]
مرحله گل‌دهی Anthesis	456.28[b]	1743.69[b]	0.76[b]	0.42[b]	0.49[a]	0.23[a]	3.57[a]
شاهد Control	448.17[b]	1758.72[d]	0.75[b]	0.50[a]	0.48[a]	0.25[a]	3.61[a]

* در هر ستون و برای هر عامل میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار هستند (آزمون دانکن با احتمال خطای پنج درصد)

* Means with similar letters in each column and each factors are not significantly different at 5% probability level.

I_1: شاهد، I_2: آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن آبیاری در ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس، I_3: آبیاری نرمال تا گرده‌افشانی و بعد از آن قطع کامل آبیاری

I_1: Normal irrigation, I_2: Normal irrigation from planting date to pollination stage and irrigation at 60% available moisture discharge afterward, I_3: Normal irrigation in from planting date to pollination stage then with holding cut off irrigation

در شرایط تنش خشکی، تجمع QB غیراحیاء افزایش می‌یابد کـه این امر نشان‌دهنده عدم انتقال الکترون از QA احیا به QB اسـت. در

تنش خشکی شرایط تجمع QA نیز افزایش می‌یابد. علت این امر هنوز کاملاً مشخص نیست، ولی ممکن است کاهش آسیمیلاسیون CO_2 در اثر بسته شدن روزنه‌ها در شرایط تنش خشکی منجر به مصرف نشدن محصولات حاصل از زنجیره انتقال الکترون (NADPH و ATP) شده و از این طریق میزان فرودوکسین یا احیاء افزایش یافت و به‌دنبال افزایش فرودوکسین احیاءشده، تولید رادیکال‌های فعال افزایش یافت و از این طریق، تغییر و یا تخریب پروتئین‌های غشاء تیلاکوئید صورت گیرد. بنابراین تخریب پروتئین-های غشای تیلاکوئید، مانع انتقال الکترون از جایگاه پذیرنده فتوسیستم II می‌گردد و این امر موجب کاهش سرعت انتقال الکترون، افزایش فلورسانس کلروفیل و کاهش عملکرد فتوسیستم II می‌شود. تغییر میزان فعالیت فتوسیستم II و همچنین تخریب ساختمان پروتئین D1 موجود در فتوسیستم II، در نتیجه افزایش فلورسانس کلروفیل در شرایط تنش خشکی است. نتایج حاصل از پژوهش‌ها نشان داد که کمپلکس آزادکننده اکسیژن فتوسیستم II و مراکز واکنش فتوسیستمII تحت تنش خشکی تخریب می‌شوند. اثر تخریبی تنش خشکی بر پروتئین‌های D1 که در ساختمان فتوسیستم IIقرار دارد نیز گزارش شده است (Thakur et al., 2025; Katherine et al., 2023). کاهش سرعت انتقال الکترون و عملکرد کوانتومی فتوسیستم II گیاه در شرایط تنش خشکی ممکن است به‌دلیل تخریب سیکل کالوین، به تأخیر افتادن احیای کوئینون‌ها و همچنین تخریب زنجیره انتقال الکترون غشای تیلاکوئید باشد (Tilahun & Sven, 2003).

همبستگی صفات

نتایج همبستگی صفات مورد مطالعه نشان داد که عملکرد دانه همبستگی منفی و معنی‌داری با صفات خاموشی غیرفتوشیمیایی (۰/۸۵-)، کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II (۰/۷۴-)، کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم‌شده فتوسیستم II (۰/۷۱)، کارآیی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II (۰/۷۵-) داشت. علاوه‌بر این، عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری با صفات شاخص کلروفیل (۰/۹۰)، رطوبت نسبی برگ (۰/۸۴) و عملکرد بیولوژیک (۰/۹۷) داشت. عملکرد دانه بیشترین همبستگی مثبت و معنی‌دار را با عملکرد بیولوژیک داشت (جدول ۸). همبستگی بین صفات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا میزان و نوع رابطه بین دو یا چند صفت را معین می‌کند و زمانی که برای صفتی گزینش در نظر گرفته می‌شود، باید به تأثیر آن صفت بر صفات دیگر توجه شود.

جدول ۸- همبستگی صفات مورد مطالعه

Table 8- Correlation of studied traits

n=120

	NPQ	Y (NO)	Y(NPQ)	Y (II)	Fv/Fm	F_t	F_v	$F_{m'}$	F_m	F_0	Chl.I	RWC	BY	GY
NPQ	1	0.80^{**}	0.82^{**}	0.78^{**}	-0.64^{**}	-0.80^{**}	-0.53^{*}	-0.69^{*}	-0.80^{**}	-0.85^{**}	-0.74^{**}	-0.74^{**}	-0.74^{**}	-0.85^{**}
Y (NO)		1	0.84^{**}	0.81^{**}	-0.71^{**}	-0.63^{*}	-0.41^{**}	-0.65^{**}	-0.75^{**}	-0.58^{*}	-0.68^{**}	-0.68^{**}	-0.68^{**}	-0.74^{**}
Y(NPQ)			1	0.85^{**}	-0.80^{**}	-0.75^{**}	-0.62^{**}	-0.70^{**}	-0.77^{**}	-0.71^{**}	-0.73^{**}	-0.73^{**}	-0.73^{**}	-0.71^{*}
Y (II)				1	-0.69^{**}	-0.66^{**}	-0.61^{**}	-0.68^{**}	-0.60^{**}	-0.69^{**}	-0.77^{**}	-0.77^{**}	-0.77^{**}	-0.75^{*}
Fv/Fm					1	0.31	0.27	0.42	0.50	0.31	0.41	0.26	0.30	0.67^{*}
F_t						1	0.35	0.35	0.47	0.27	0.34	0.28	0.44	0.52
F_v							1	0.34	0.31	0.30	0.40	0.30	0.35	0.43
$F_{m'}$								1	0.40	0.28	0.38	0.50	0.40	0.37
F_m									1	0.24	0.39	0.33	0.27	0.28
F_0										1	0.42	0.28	0.39	0.40
Chl.I											1	0.88^{**}	0.95^{**}	0.90^{**}
RWC												1	0.87^{**}	0.84^{**}
BY													1	0.97^{**}
GY														1

** و *: به‌ترتیب معنی‌دار با احتمال خطای یک و پنج درصد و اعداد بدون علامت: غیرمعنی‌دار می‌باشد.

* and **: significant at 5% and 1% levels of probability, respectively, Unsigned numbers: are not significant,

NPQ: خاموشی غیرفتوشیمیایی، Y (NO): کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم نشده فتوسیستم II، Y (NPQ): کارآیی کوانتومی غیرفتوشیمیایی تنظیم‌شده فتوسیستم II، Y (II): کارآیی کوانتومی فتوشیمیایی مؤثر فتوسیستم II، Fv/Fm: حداکثر کارآیی کوانتومی فتوسیستم II، Fv: فلورسانس متغیر، Ft: فلورسانس پایدار ، Fm´: فلورسانس بیشینه در حالت اشباع، Fm: فلورسانس بیشینه، F0: فلورسانس کمینه، Chl.I: شاخص کلروفیل، RWC: رطوبت نسبی برگ، GY: عملکرد دانه، BY: عملکرد بیولوژیک.

NPQ: non-photochemical quenching, Y (NO): unregulated non-photochemical quantum efficiency of photosystem II, Y (NPQ): regulated non-photochemical quantum efficiency of photosystem II, Y (II): effective photochemical quantum efficiency of photosystem II, Fv/Fm: maximum quantum efficiency of photosystem II, Fv: variable fluorescence, Ft: steady-state fluorescence,

´Fm: maximum fluorescence at saturation, Fm: maximum fluorescence, F0: minimum fluorescence, Chl.I: chlorophyll index, RWC: leaf relative humidity, GY: grain yield, BY: biological yield.

همبستگی مثبت بین عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص کلروفیل و رطوبت نسبی برگ را می‌توان به این دلیل نسبت داد که این صفات به‌طور مستقیم بر بهره‌وری کلی گیاه تأثیر مثبت دارند و همچنین همبستگی منفی عملکرد دانه با صفات کارآیی کوانتومی فتوسیستم ممکن است به این دلیل باشد که این صفات تأثیر منفی بر رشد گیاه داشته و موجب اختلال در سیستم فتوسنتز و رشد گیاه می شوند (Ibrahim, 2019). سایر محققان نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری را بین عملکرد دانه گندم و عملکرد بیولوژیک، شاخص کلروفیل و رطوبت نسبی برگ بیان کردند که با نتایج حاصل از پژوهش حاضر مطابقت داشت (Ullah et al., 2021; Ibrahim, 2019).

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان اظهار داشت که تنش خشکی، اثر بازدارندگی بر فعالیت‌های مختلف دستگاه فتوسنتزی به‌خصوص فعالیت فتوسیستم II در گندم دارد. در مطالعه حاضر مشخص شد که شاخص‌های فلورسانس کلروفیل به همراه محتوای کلروفیل، نقش ویژه‌ای در بررسی اثرات تنش خشکی بر سیستم‌های فتوسنتزی گیاه دارند. بنابراین با اعمال تنش خشکی، میزان تعرق، تبادلات گازی، حداکثر کارآیی فتوشیمیایی فتوسیستم II، فلورسانس بیشینه (F_m) و سرعت فتوسنتز کاهش یافت. امّا استفاده از هورمون سیتوکینین و کاربرد توأم عناصر ریزمغذی به‌طور معنی‌داری سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، شدت تعرق، حداکثر کارآیی فتوشیمیایی فتوسیستم II، فلورسانس بیشینه (F_m)، فلورسانس کمینه (F_0)، رطوبت نسبی و محتوای کلروفیل را افزایش داد. شرایط آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (نرمال) موجب افزایش عملکرد گندم نسبت به سطوح تنش خشکی شد. به‌دلیل اینکه مرحله گل‌دهی گندم، حساس‌ترین مرحله رشدی به تنش خشکی است، لذا اعمال تنش خشکی در این مرحله توصیه نمی‌شود. کاربرد توأم عناصر ریزمغذی نانو (روی + آهن+ سلنیوم) منجر به افزایش عملکرد گندم نسبت به کاربرد تک تک آن‌ها شد، لذا محلول‌پاشی توأم این سه عنصر برای افزایش عملکرد گندم توصیه می‌شود. محلول‌پاشی سیتوکنین در مرحله گرده‌افشانی + شیری دانه، عملکرد گندم را نسبت به مصرف در سایر مراحل افزایش داد، هرچند که منابع مختلف کاربرد عناصر تغذیه‌ای ریزمغذی نانو و محلول‌پاشی سیتوکنین را برای تحمل به تنش آبی مهم می‌دانند، امّا نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در شرایط وجود تنش، این راهکارها برای کاهش اثرات منفی ناشی از تنش خشکی قابل توصیه نمی‌باشد.

References

1. Adil, M., Bashir, S., Bashir, S., Aslam, Z., Ahmad, N., Younas, T., Asghar, R. M. A., Alkahtani, J., Dwiningsih, Y., & Elshikh, M. S. (2022). Zinc oxide nanoparticles improved chlorophyll contents, physical parameters, and wheat yield under salt stress. Front. *Plant Science*, *13*, 932861. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.932861
2. Agricultural Statistics. (2022-2023). *Ministry of Agriculture Jihad, Crops*, *1*, 100.
3. Ali, A., Ullah, Z., Sher, H. Abbas, Z., & Rasheed, A. (2023). Water stress effects on stay green and chlorophyll fluorescence with focus on yield characteristics of diverse bread wheat. *Planta*, *257*, 104. https://doi.org/10.1007/s00425-023-04140-0
4. Anwar, S., Khalilzadeh, R., Khan, S., Nisa, Z., Bashir, R., Pirzad, A., & Malik, A. (2021). Mitigation of drought stress and yield improvement in wheat by zinc foliar spray relates to enhanced water use efficiency and zinc contents. *International Journal of Plant Production*, *15*, 377–389. https://doi.org/10.1007/s42106-021-00136-6
5. Askari, A., Ardakani, M. R., Vazan, S., Palnejad, F., & Hosseini, Y. (2017). The effect of mycorrhizal symbiosis and seed priming on the amount of chlorophyll index and absorption of nutrients under drought stress in sesame plant under field conditions. *Applied Ecology and Environmental Research*, *16*(1), 335-357. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1601_335357.
6. Baker, N. R., & Rosenqvist, E. (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, *55*, 1607-1621. https://doi.org/10.1093/jxb/erz535
7. Bartlett, M. S. (1937). Properties of sufficiency and statistical tests. *Mathematical and Physical Sciences*, *160*, 268-282. https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0109
8. Bhandari, R., Gnawali, S., Nyaupane, S., Kharel, S., Poudel, M., & Panth, P. (2021). Effect of drought and irrigated environmental condition on yield & yield attributing characteristic of bread wheat-A review. *Reviews in Food and Agriculture*, *2*(2), 59–62. http://doi.org/10.26480/rfna.02.2021.59.62
9. Castañeda-Murillo, C. C., Rojas-Ortiz, J. G., Sánchez-Reinoso, A. D., Chávez-Arias, C. C., & Restrepo-Díaz, H. (2022). Foliar brassinosteroid analogue (DI-31) sprays increase drought tolerance by improving plant growth and

photosynthetic efficiency in lulo plants. *Heliyon*, *8*(2), 1-18. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08977

10. Cappelli, A., Bettaccini, L., & Cini, E. (2020). The kneading process: A systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies. *Trends Food Science and Technology*, *104*, 91–101. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.008
11. Dimkpa, C. O., & Bindraban, P. S. (2016). Fortification of micronutrients for efficient agronomic production: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *36*(1), 1-26. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0346-6
12. Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. (2014). Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *33*, 331–349. https://doi.org/10.1080/07352689.2014.875291
13. Ferrat, I. L., & Loval, C. J. (1999). Relation between relative water content, nitrogen pools, and growth of *P. vulgaris* and *P. acutifolius* during water deficit. *Crop Science*, *39*, 467-474. https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X0039000200028x
14. Guerrini, L., Napoli, M., Mancini, M., Masella, P., Cappelli, A., Parenti, A., & Orlandini, S. (2020). Wheat grain composition, dough rheology and bread quality as affected by nitrogen and sulfur fertilization and seeding density. *Agronomy*, *10*, 233-250. https://doi.org/10.3390/agronomy10020233
15. Hlahla, J. M., Mafa, M. S., van der Merwe, R., & Moloi, M. J. (2024). Exploring edamame survival mechanisms under combined drought and heat stress: Photosynthesis efficiency and carbohydrate accumulation, *Plant Stress*. *14*, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100616
16. Han, X., Han, S., Li, Y., Li, K., Yang, L., Ma, D., Fang, Z., Yin, J., Zhu, Y., & Gong, S. (2023). Double roles of light-harvesting chlorophyll a/b binding protein TaLhc2 in wheat stress tolerance and photosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*, *253*(5), 1-18. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127215
17. Hayyawi W. A., Al-Juthery, E. A., Ali, H. M., Rafid, N., Al-Ubori, Q., NAl-Shami, M., Duraid K., & AL-Taey, A. (2020). Role of foliar application of nano NPK micro fertilizers and yeast extract on growth and yield of wheat. *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*, *16*(1), 1295-1300.
18. Hussain, A., & Jatoi, W. A. (2021). Drought tolerance indices of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under water deficit conditions. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, *20*, 1–19.
19. Ibrahim, A. U. (2019). Genetic variability, correlation and path analysis for yield and yield components in F6 generation of wheat (*Triticum aestivum* Em. Thell.). *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, *12*, 17–23.
20. Jameson, P. E., & Song, J. (2016). Cytokinin: A key driver of seed yield. *Journal of Experimental Botany*. *67*, 593-606. https://doi.org/10.1093/jxb/erv461
21. Kamal, T., Atiq, M., Khan, U., Khan, F. U., & Ahmed, S. (2020). Comparison among different stability models for yield in bread wheat. *Sarhad Journal of Agriculture*, *36*, 282–290. http://dx.doi.org/10.17582/journal.sja/2020/36.1.282.290
22. Katherine, A., Steven, M., Augustine, P., Goke, A., Jordan, R., Christopher, P., Kimberly, K., & Smith, D. (2023). At least it is a dry cold: the global distribution of freeze–thaw and drought stress and the traits that may impart poly-tolerance in conifers, *Tree Physiology*, *43*(1), 1–15. https://doi.org/10.1093/treephys/tpac102
23. Klughammer, C., & Schreiber, U. (2008). Complementary PS II quantum yields calculated from simple fluorescence parameters measured by PAM fluorometry and the Saturation Pulse method. *PAM Application Notes*, *1*(2), 201-247.
24. Kruk, J., & Szymańska, R. (2021). Singlet oxygen oxidation products of carotenoids, fatty acids and phenolic prenyllipids. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *216*, 1-18. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112148
25. Lai, H., Li, X., Chen, Y., & Liu, Z. (2024). Mitigating heat-induced yield loss in peanut: Insights into 24-epibrassinolide-mediated improvement in antioxidant capacity, photosynthesis, and kernel weight. *Field Crops Research*, *316*, 1-17. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109521
26. Li, G., Wan, S., Zhou, J., Yang, Z., & Qin, P. (2010). Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of castor bean (*Ricinus communis* L.) seedlings to salt stress levels. *Industrial Journal of Crops and Products*, *31*(1), 13-19. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.07.015
27. Li, Q., Chen, M., Li, X., Wang, Y., Zhu, Q., Gao, S., Wang, J., Wang, Y., Yu, F., Wang, X., Huo, K., & Zhang, L. (2022). Effects of foliar spraying of selenite at different time points on selenium concentration in wheat grains during grain filling period. *Grassland Science*, *68*(4), 354-361. https://doi.org/10.1111/grs.12376
28. Mannan, M. A., Tithi, M. A., & Islam, M. R. (2022). Soil and foliar applications of zinc sulfate and iron sulfate alleviate the destructive impacts of drought stress in wheat. *Cereal Research Communications*, *50*, 1279–1289. https://doi.org/10.1007/s42976-022-00262-5
29. Minolta, M. (1989). Manual for Chlorophyll Meter SPAD-502. Minolta Camera Co., Ltd., Japan.
30. Mohammed Al-Toki, M. A., & Halloul, R. (2021). The effect of chelated zinc and nano-zinc and interaction on growth traits of wheat (*Triticum aestivum* L.). Conference Series. *Earth Environment Science*, *923*, 012072.

https://doi.org/10.1088/1755-1315/923/1/012072

31. Paknejad, F., Nasri, M., Tohidi Moghadam, H. R., Zahedi, H., & Jami Alahmad, M. (2007). Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters chlorophyll content and grain yield of wheat cultivars. *International Journal of Biological Sciences*, *7*(6), 841-847. https://doi.org/10.3923/jbs.2007.841.847
32. Pequeno, D. N. L., Hernández-Ochoa, I. M., Reynolds, M., Sonder, K., MoleroMilan, A., Robertson, R. D., Lopes, M. S., Xiong, W., Kropff., M., & Asseng, S. (2021). Climate impact and adaptation to heat and drought stress of regional and global wheat production. *Environmental Research Letters*, *16*(5), 1-18. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd970
33. Raza, M. A. S., Zaheer, M. S., Saleem, M. F., Khan. I. H., Ahmad, S., Aslam, M. U., & Iqbal, R. (2020). Drought ameliorating effect of exogenous applied cytokinin in wheat. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, *57*(3), 725-733.
34. Sandoval, Y., Tighe-Neira, R., Inostroza-Blancheteau, C., Soto-Cerda, B., & González-Villagra, J. (2024). Melatonin improves plant water status, photosynthetic performance, and antioxidant defense system in highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) plants subjected to drought stress. *Scientia Horticulturae*, *323*(1), 1-18. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112528
35. Saquee, F. S., Diakite, S., Kavhiza, N. J., Pakina, E., & Zargar, M. (2023). The efficacy of micronutrient fertilizers on the yield formulation and quality of wheat grains. *Agronomy*, *13*(2), 566. https://doi.org/10.3390/agronomy13020566
36. Seleiman, M. F., & Kheir, A. M. S. (2018). Saline soil properties, quality and productivity of wheat grown with bagasse ash and thiourea in different climatic zones. *Journal of Chemosphere, 193*, 538-546. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.053
37. Si, Z. H., Zain, M., Mehmood, F., Wang, G., Gao, Y., & Duan, A. (2020) Effect of nitrogen application rate and irrigation regime on growth, yield, and water-nitrogen use efficiency of drip-irrigated winter wheat in the North China Plain. *Journal of Agricultural Water Management*, *231*, 106002. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106002
38. Sommer, S. G., Han, E., Li, X., Rosenqvist, E., & Liu, F. (2023). The Chlorophyll fluorescence parameter Fv/Fm correlates with loss of grain yield after severe drought in three wheat genotypes grown at two CO_2 concentrations. *Plants*, *12*, 436. https://doi.org/10.3390/plants12030436
39. Thakur, G., Singh, P., & Sharma, V. (2025). Phytohormonal crosstalk with flowering genes regulating drought stress response in citrus: A systematic review. *Journal of Plant Growth Regulation*, *14*, 1-18. https://doi.org/10.1007/s00344-025-11838-w.
40. Tilahun, A., & Sven, S. (2003). Mechanisms of drought resistance in grain: PSII stomatal regulationand root growth. *Ethiop Journal of Science Technology*, *26*, 137-144.
41. Titov, A. F., Kaznina, N. M., Karapetyan, T. A., Dorshakova, N. V., & Tarasova, V. N. (2022). Role of selenium in plants, animals, and humans. *Biology Bulletin Reviews*, *12*, 189–200. https://doi.org/10.1134/S2079086422020104.
42. Ullah, M. I., Mahpara, S., Bibi, R., Ullah Shah, R., Ullah, R., Abbas, S., Ullah, M. I., Hassan, A. M., El-Shehawi, A. M., Brestic, M., Zivcak, M., & Khan, M. I. (2021). Grain yield and correlated traits of bread wheat lines: Implications for yield improvement. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *28*(10), 5714-5719. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.006.
43. Wan, C., Dang, P., Gao, L., Wang, J., Tao, J., Qin, X., Feng, B., & Gao, J. (2022). How does the environment affect wheat yield and protein content response to drought? A meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 1-18. 896985. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.896985
44. Wasaya, A., Manzoor, S., Yasir, T. A., Sarwar, N., Mubeen, K., Ismail, I. A., Raza, A., Rehman, A., Hossain, A., & EL Sabagh, A. (2021). Evaluation of fourteen bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes by observing gas exchange parameters, relative water and chlorophyll content, and yield attributes under drought stress. *Sustainability*, *13*(9), 4799. https://doi.org/10.3390/su13094799
45. Yan, Z., Ma, T., Guo, S., Liu, R., & Li, M. (2021). Leaf anatomy, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of lettuce as influenced by arbuscular mycorrhizal fungi under high temperature stress. *Scientia Horticulturae*, *280*, 109933. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109933
46. Yang, D., Luo, Y., Kong, X., Haung, C., & Wang, Z. (2021). Interactions between exogenous cytokinin and nitrogen application regulate tiller bud growth via sucrose and nitrogen allocation in winter wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, *40*, 329–341. https://doi.org/10.1007/s00344-020-10106-3
47. Zhang, Y., Li, Y., Liu, J., Suo, L., Li, D., He, L., Duan, J., Wang, Y., Feng, W., & Guo, T. (2025). Exogenous melatonin alleviates drought stress in wheat by enhancing photosynthesis and carbon metabolism to promote floret development and grain yield. *Plant Stress*, *16*(4), 1-19. https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100885